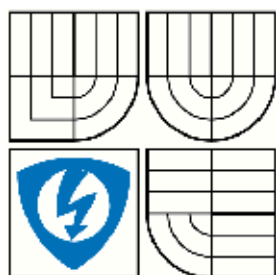


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS**

SPÍNANÝ LABORATORNÍ ZDROJ NAPĚTÍ

SWITCHED LABORATORY POWER SOURCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

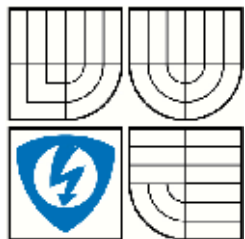
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR DIVÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVLÍK, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav Mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Petr Divílek
Ročník: 3

ID: 106402
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Spínaný laboratorní zdroj napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte spínaný laboratorní zdroj s regulovatelným výstupem 0-30 V a nastavitelným proudovým omezením 0-2,5 A s reakční dobou kratší než 1 ms. Ovládání nastavení výstupních hodnot řešte analogově.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha: Technická literatura BEN, 2002, ISBN 80-86056-02-3.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. Praha: Technická literatura BEN, 2002, ISBN 80-86056-03-1.
- [3] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice 5.vydání*. Praha: Technická literatura BEN, 2002, ISBN 80-7300-059-8.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt:

Cílem práce je podat ucelený přehled, týkající se problematiky spínaných zdrojů. Postupným popisem obvodových součástí a jejich funkcí je v práci vysvětleno, jak spínané zdroje pracují. Bakalářská práce je zaměřena na popis, simulaci, návrh a výrobu spínaného zdroje napájeného z běžného PC zdroje ATX, kde je použito 12 V.

Abstract:

The main aim of this work is to provide an overall summary of the problem of switched power supply. The stepwise description of the circuit components and their functions explains the way how the switching power supplies work. Bachelor thesis is focused on description, simulation and design of switching power supply powered by current PC of the ATX resource, where 12 V is used.

Klíčová slova:

Spínaný zdroj, měniče, ČUKův měnič, SEPIC měnič, obvod NCP3065, ATX zdroj, simulace, návrh, výrobek

Keywords:

Switched power supply, converters, CUK converter, SEPIC converter, NCP3065 circuit, ATX supply power, simulation, design, product

Bibliografická citace díla:

DIVÍLEK, Petr. *Spínaný laboratorní zdroj napětí-bakalářská práce*. Brno, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Pavlík, Ph.D. FEKT VUT v Brně.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Spínaný laboratorní zdroj napětí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31.5.2010

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Pavlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31.5.2010

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod:	9
1. Teoretický rozbor	10
1.1 Spínané zdroje obecně.....	10
1.2 Výhody/nevýhody spínaných zdrojů	11
1.3 Použití spínaných zdrojů	11
1.4 Základní zapojení	11
1.5 Jednotlivé části spínaného zdroje.....	12
1.5.1 Požadavky kladené na součásti	13
1.5.2 Napěťové měniče	14
1.5.3 Obvod NCP3065.....	18
1.5.4 Řízení výstupního napětí.....	23
2. Simulace	24
2.1 Simulace obvodu pro řízení výstupního napětí	25
2.1.1 Parametry.....	25
3. Výpočty reálných součástek	28
4. Výroba DPS	31
4.1 Návrh DPS	31
5. Závěr	32
Literatura	33
Příloha:	35
Seznam součástek použitých na DPS	35
Schéma zapojení zvyšující napětí	37
Schéma zapojení snižující napětí	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1) Blokové schéma Spínaného zdroje	12
Obrázek 2) Jednočinný blokovací měnič.....	14
Obrázek 3) Jednočinný blokovací měnič s impulzním transformátorem	14
Obrázek 4) Jednočinný propustný měnič	15
Obrázek 5) Dvojčinný měnič	15
Obrázek 6) Rezonanční měnič.....	15
Obrázek 7) Základní zapojení ČUKova měniče.....	16
Obrázek 8) Základní zapojení sepic měniče	18
Obrázek 9) Vnitřní zapojení obvodu NCP3065	19
Obrázek 10) Zapojení rozdílového zesilovače	23
Obrázek 11) Zapojení součtového zesilovače.....	23
Obrázek 12) Simulační prostředí MultiSim	24
Obrázek 13) Simulační obvod s operačním zesilovačem TLC272CP...	25
Obrázek 15) Návrh DPS v programu EAGLE.....	31
Obrázek 16) Fotka obou vyrobených DPS. Nahoře se snižujícím měničem, dole se zvyšujícím měničem.....	31

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1) Vstupní/výstupní proudy a napětí	16
Graf 2) Časování obvodu NCP3065	21
Graf 3) Závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně referenčního napětí	27
Graf 4) Závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně odporu	27

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1) Porovnávací tabulka zdrojů z roku 2001	10
Tabulka 2) Tabulka se vzorci pro výpočet důležitých parametrů použitých zapojení.....	22
Tabulka 3) Tabulka odsimulovaných hodnot.....	26

Úvod:

Tato práce se věnuje problematice spínaných zdrojů (switched power supply). V první kapitole je uvedeno, z čeho se spínané zdroje skládají, na jakém principu pracují a jaké mají využití v praxi. V práci jsou uvedeny a popsány i měniče v zapojení ČUK a SEPIC, které jsou znázorněny i s ukázkou obvodového zapojení. Právě tyto dvě topologie bývají důležitou částí spínaného zdroje. Základní funkcí spínaného zdroje je i řízení výstupního napětí, a proto je simulace a návrh analogového řízení v práci uvedena podrobněji.

Poslední část bakalářské práce je zaměřena na návrh a výrobu desky plošných spojů (DPS) a následné „oživení“ celého spínaného zdroje tak, aby bylo možné zdroj využít jako plnohodnotný laboratorní zdroj.

1. Teoretický rozbor

Studentská práce je zaměřena na téma spínaných zdrojů. Součástí práce bude popis jednotlivých součástí zdroje, vysvětlení BUCK a BOOST zapojení, simulace analogového řízení výstupního napětí a výroba samotného laboratorního spínaného zdroje.

1.1 Spínané zdroje obecně

V dnešní době se s různými spínanými zdroji lze setkat u mnoha výrobků. Hlavně pak ve spotřební, výpočetní nebo průmyslové elektronice, kde je potřeba transformovat síťové napětí 230 V. Jako názorný příklad spínaného zdroje lze použít běžný PC zdroj ATX s výkonem 200 W. Zdroj o stejném výkonu postavený z „železného“ traťu, lineárních stabilizátorů s objemnými chladiči a filtračními kondenzátory by měl několikanásobně větší velikost, váhu, odběr atd., než zdroj spínaný.

Spínané zdroje mají celou řadu výhod. Mezi ně patří hlavně rozměry, váha a účinnost. Právě účinnost spínaných zdrojů je považována za největší ze všech ostatních, jelikož přesahuje 80 % oproti zdrojům lineárním. Výhodou je také to, že komponenty pro stavbu spínaného zdroje jsou dnes cenově dostupným zbožím v každé prodejně součástek, a tak si spínaný zdroj může postavit každý kvalifikovaný elektrotechnik. Stavba zdrojů je navíc ulehčena tím, že hlavní řídicí obvod v sobě integruje mnoho prvků řídicích jednotek. Některé integrované obvody v sobě integrují i spínací prvky.

Pro přehlednost je uvedena srovnávací tabulka obecných parametrů lineárních a spínaných zdrojů. Parametry jsou zprůměrovány. Elektrické vlastnosti závisí také na konkrétním provedení, obvodovém zapojení a použitých součástkách. Uvedená tabulka byla platná v roce 2001, některé hodnoty se tedy mohou lišit od hodnot dnešních [9], [2].

Tabulka 1) Porovnávací tabulka zdrojů z roku 2001[4]

Parametr	Jednotka	Lineární zdroj	Spínaný zdroj
poměr výkon / váha	[W/kg]	20	100
účinnost	[%]	40-50	> 80
poměr výkon / objem	[W/cm ³]	0,05	0,2
výstupní zvlnění	[mV]	5	50
šum na výstupu	[mV]	50	200
odezva na skokovou změnu zátěže	[ms]	0,02	1
dooba náběhu	[ms]	2	20
cena realizace		prudce stoupá s výkonem	mírně stoupá s výkonem
Poznámka: S rostoucím kmitočtem se zlepšují kvalitativní ukazatele ve prospěch spínaných zdrojů			

1.2 Výhody/nevýhody spínaných zdrojů

Spínané zdroje mají několik výhod. Mezi ně patří například jejich vysoká účinnost (většinou nad 80 %)- jak již bylo zmíněno. Další velkou výhodou je jejich minimální váha a rozměry, a také snadná filtrovatelnost zbytků střídavé složky. V porovnání s klasickými lineárními zdroji jsou spínané zdroje výhodnější tam, kde je požadován velký rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím. Především jsou výhodnější také ekonomicky.

Nevýhodami spínaných zdrojů jsou například vyšší cena některých součástek a pomalejší reakce výstupního napětí na rychlé změny zatěžovacího proudu. Jsou také zdrojem rušení, které generují spínací prvky [9], [2].

1.3 Použití spínaných zdrojů

V dnešní době je používání spínaných zdrojů tak rozšířené, že je možné je nalézt skoro v každé kancelářské a výpočetní technice (PC zdroje), spotřební elektrotechnice (např. televizory, výkonové zesilovače), ale také v menších svářečkách, laboratorních zdrojích a v zesilovačích [9].

1.4 Základní zapojení

Aby spínaný zdroj fungoval tak, jak je požadováno, musí být všechny jeho části správně navrženy. Jelikož spínaný zdroj pracuje jen se stejnosměrným napětím, je nutné, aby na vstup řídicí jednotky bylo přivedeno řádně vyfiltrované stejnosměrné napětí. Blokové zapojení je znázorněno na obrázku 2.

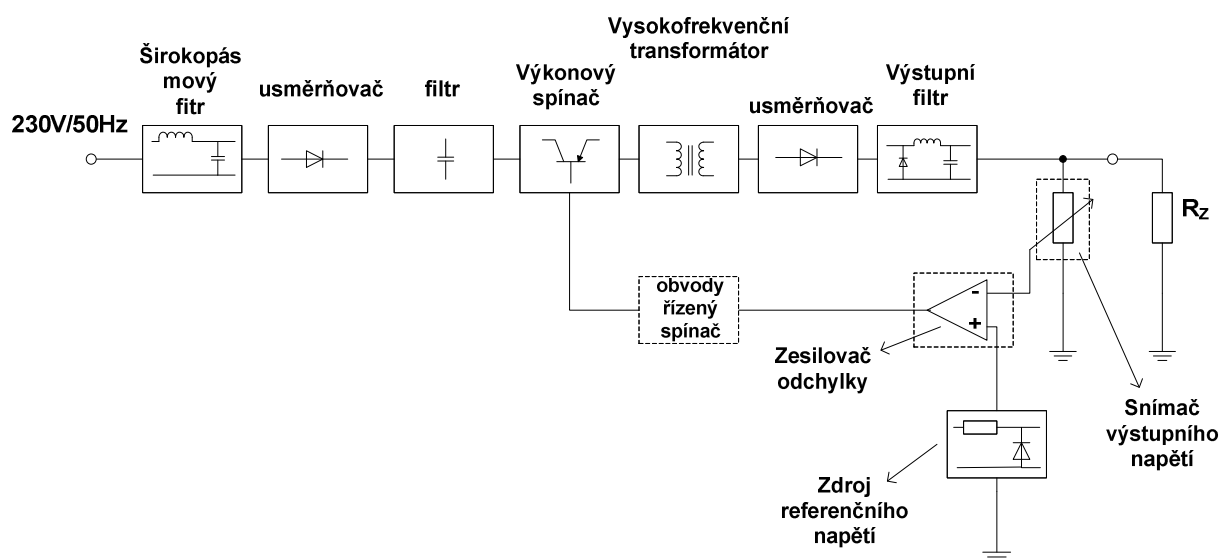
Spínané zdroje lze rozdělit do dvou zapojení. Jedná se o zapojení se stejnosměrným vstupním napětím, kde náročnost na výstupní filtr nebude velká, anebo zapojení se střídavým napětím na vstupu, kde po usměrnění střídavé složky musíme zaručit vyhlazení zbytkového zvlnění.

Usměrňovač i vstupní filtr musí být dostatečně účinný na síťovém kmitočtu 50 Hz. K tomu lze použít libovolných usměrňovacích diod (samozřejmě vhodných parametrů). Pro transformaci vstupního napětí jej musíme převést na střídavý tvar. To se provádí pomocí vysokofrekvenčních spínacích tranzistorů, které při kmitočtech 20 – 2000 kHz vytvoří střídavý obdélníkový průběh. Transformace napětí se pak provádí pomocí induktoru nebo transformátoru.

Po transformaci opět následuje operace usměrnění a vyfiltrování, konečným výstupem je stejnosměrné napětí. Na rozdíl od vstupního usměrňovacího obvodu je zde kladen důraz na usměrňovací diody, které musí vykazovat usměrňovací efekt na pracovním kmitočtu

(malá kapacita přechodu, malá spínací a zejména vypínací doba). Výstupní filtr má vynikající filtrační účinky při vysokém kmitočtu, proto na něj není kladen takový důraz jako na diody [5], [2].

Spínané zdroje pracují i se zpětnou vazbou. Ta snímá velikost výstupního napětí nebo výstupního proudu a pomocí logiky řídí spínání tranzistorů.



Obrázek 1) Blokové schéma Spínaného zdroje [12]

1.5 Jednotlivé části spínaného zdroje

Každý zdroj se skládá z několika důležitých částí, které jsou potřebné pro jeho správné fungování. V případě spínaných zdrojů jsou to tyto části:

- Vstupní filtr
- Usměrňovač
- Filtr
- Tranzistorový spínač řízený zpětnou vazbou
- Transformátor s galvanicky odděleným vynutím
- Sekundární usměrňovač
- Výstupní filtr (LC,RC)
- Zpětná vazba (řídicí člen)

1.5.1 Požadavky kladené na součásti

Vstupní filtr - vstupní filtr musí dokonale odstranit zbytkové vlnění tvořené spínacími prvky tak, aby nebyla překročena dovolená míra [5].

Usměrňovač s filtračním kondenzátorem - jak bylo zmíněno výše, na usměrnění síťového napětí lze použít klasické polovodičové diody. Filtrační kondenzátor musí snášet minimální napětí okolo 400 V, a také musí mít malé ESR (efektivní sériový odpor), aby byl schopen dodávat krátké, ale velké proudové impulzy [5].

Výkonový tranzistorový spínač - výkonový tranzistorový spínač je jednou z nejdůležitějších, ale také nejproblematičtějších součástí zdroje. Jsou na něj proto kladeny také nejvyšší požadavky. Jedním z požadavků je závěrné napětí U_{CE} , které musí mít až 1000 V. Spínací a vypínací časy tranzistoru musí být co nejkratší, nejvyšší čas spínání/rozpínání by měl být maximálně 1-2 % pracovního cyklu měniče. Kolektorový proud je potom závislý na výstupním výkonu zdroje. U tranzistorů FET je nutno brát ohled na dovolený proud I_D , který klesá se stoupající teplotou tranzistoru [5], [9].

Impulsní transformátor - další velmi důležitá součást, která ovlivňuje funkčnost celého zdroje. Pro vlastnosti transformátoru je rozhodující feritové jádro a jeho charakteristické rysy pro dané kmitočtové pásmo. Způsob jakým se navíjí transformátor, ovlivňuje jeho výslednou činnost. Při návrhu je nutné brát v úvahu, že se musí minimalizovat rozptylové indukčnosti a parazitní kapacity. Kmitočet, na kterém má transformátor pracovat je velmi důležitý, protože při vysokých kmitočtech nad 100 kHz se zvyšuje povrchová vodivost (může vznikat nechtěný skin effect), a proto se používá několik tenkých paralelních vodičů (popř. vysokofrekvenční lanko na primární vedení a měděnou fólii nebo pásek na sekundární vinutí). Primární a sekundární část musejí být řádně odizolovány (obvykle tř. II – dvojitá izolace) [5], [9].

Sekundární usměrňovač - podílí se na celkové účinnosti zdroje, zvláště pokud se usměrňují nízká napětí a velké proudy. Oproti vstupnímu usměrňovači se nyní nepoužívají klasické diody, ale diody rychlé s velmi krátkou zotavovací dobou. Používají se Schottkyho diody, které mají krátkou zotavovací dobu a nižší úbytek napětí oproti klasickým polovodičovým diodám [5].

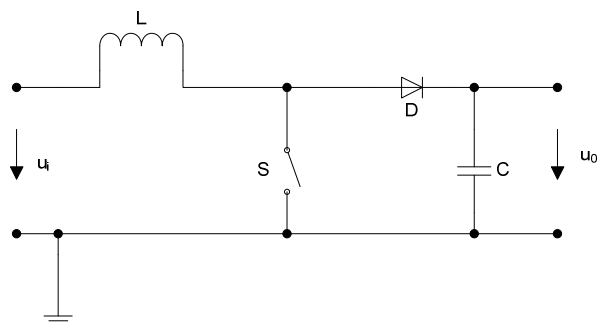
Výstupní filtr - výstupní filtr snižuje zvlnění výstupního napětí na takovou úroveň, aby bylo možné napájet navazující obvody. Funkčnost výstupního filtru je stejná jako u vstupního filtru - je zde možnost přidat tantalový kondenzátor. U tlumivky je třeba zajistit patřičnou indukčnost a minimalizovat odpor tak, aby tlumivka nezhoršovala celkovou účinnost zdroje [5].

1.5.2 Napěťové měniče

Při volbě správného typu měniče je nutno brát v úvahu to, jaký je potřeba výstupní výkon, výstupní napětí a jeho zvlnění, a další parametry.

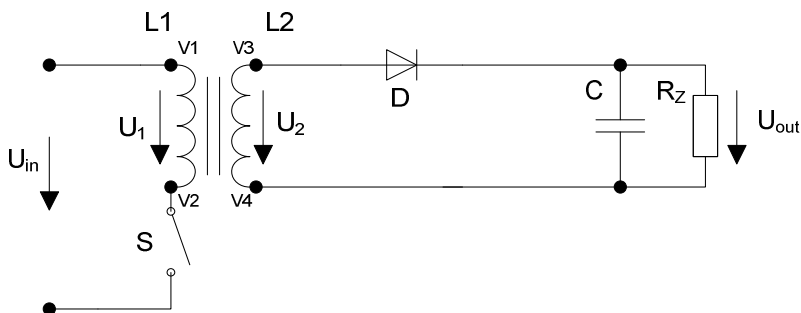
Pro regulovatelné zdroje se používají tyto základní typy měničů:

- **Jednočinný blokovací měnič (Step-up converter)**



Obrázek 2) Jednočinný blokovací měnič

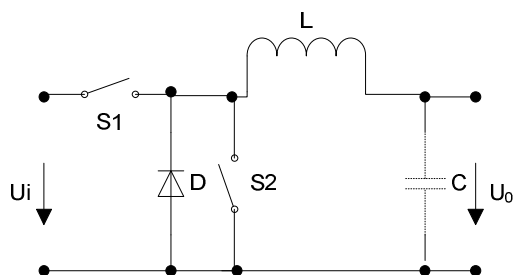
- nejjednodušší typ
- při modifikaci zapojení lze dosáhnout invertování napětí na vstupu a výstupu
- velmi často bývá používán pro malé výkony (asi 100 – 150 W) např. notebooky, tel. přijímače, nabíječky apod.



Obrázek 3) Jednočinný blokovací měnič s impulzním transformátorem

- používá se i zapojení s impulsním transformátorem místo induktoru.

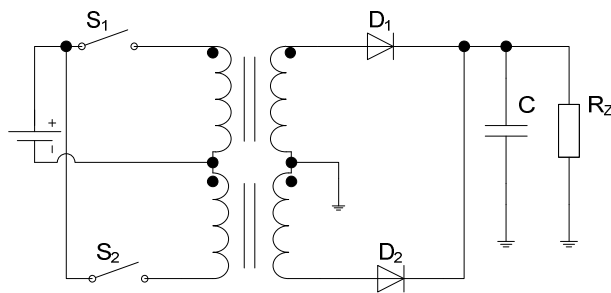
- **Jednočinný propustný měnič** (negative (positive) buck converter)



Obrázek 4) Jednočinný propustný měnič

- podle polaroty vstupního napětí a polaroty diody se dělí na NEGATIVNÍ a POZITIVNÍ.
- používá se pro oblasti středních výkonů

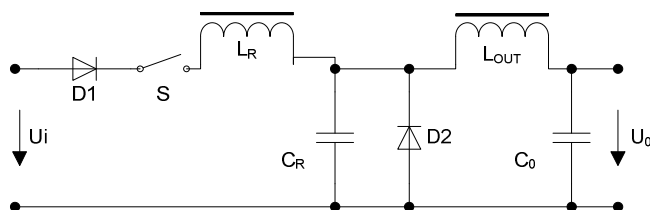
- **Dvočinný měnič** (push – pull converter)



Obrázek 5) Dvočinný měnič

- v praxi používán pro nejvyšší výkony. Nejčastěji je používán jako zdroj v PC.

- **Speciální kombinace měničů** (např. ČUKův měnič, SEPIC měnič, rezonanční měniče)

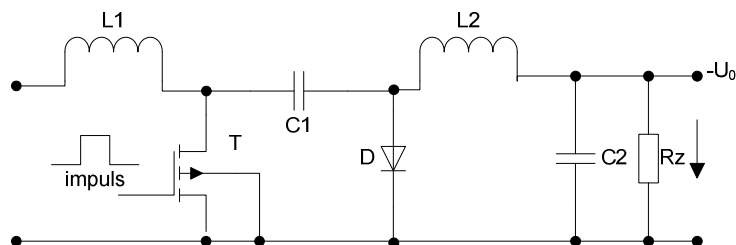


Obrázek 6) Rezananční měnič

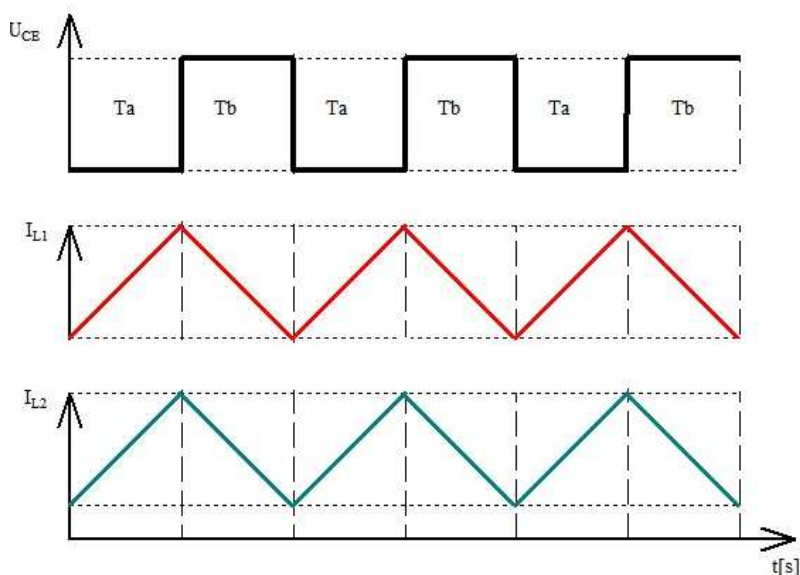
- vyznačuje se speciálním složením a použitím prvků

1.5.2.1 Čukův měnič

Tento speciální měnič má v zapojení kapacitor, který slouží pro přenos energie. Měnič je v základním zapojení tvořen spínačem, spínací diodou, akumulacním kapacitorem a dvěma induktory [6].



Obrázek 7) Základní zapojení ČUKova měniče



Graf 1) Vstupní/výstupní proudy a napětí

Funkce:

Ve fázi Tb je spínač T vypnut, přes induktor L_1 a otevřenou diodu D se nabíjí kapacitor C_1 . Proud i_{L1} podle stavu nabití kondenzátoru klesá. Ve fázi Ta spínač T sepne, proud i_{L1} lineárně roste a současně přes spínač T teče proud i_{L2} . Tento proud teče i zatěžovacím odporem a jeho zdrojem je náboj na kapacitoru C_1 z předchozího intervalu. Ve fázi Ta tedy veškeré energetické ztráty vzniklé odběrem hradí energie v kapacitoru C_1 , který se nabil ve fázi Tb.

Pokud budou induktory navrženy se společným jádrem, tak bude přenos energie ze vstupu na výstup vzhledem k induktorům L_1 a L_2 nepřerušovaný, kvantování na kapacitoru nebude kritické a jádro induktorů může být v porovnání s předchozími typy měničů podstatně menší. Všechny tyto okolnosti ukazují na dosažení nejvyšší účinnosti i při relativně nízké frekvenci spínání, kdy jsou zanedbatelné přepínací ztráty. Při použití nejmodernějších spínacích součástek a zvýšení pracovní frekvence vykazuje tento typ měniče vzhledem k nepřerušovanému proudu nejnížší vf rušení.

„U Čukova měniče se udává vysoká účinnost až 95 % a vysoká výkonová hustota 400 W/kg“[6]. Charakteristický je tento měnič také minimálním vf rušením. Vzhledem k těmto vynikajícím vlastnostem je Čukův měnič stále používanější [6].

Vzorce pro výpočet důležitých parametrů Čukova měniče [3] :

$$D_{MAX} = \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)} + V_{OUT} + V_D} \quad (1)$$

$$\Delta IL = I_{OUT} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \cdot 40\% \quad (2)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{IN(min)}}{\Delta I_L \cdot f} \cdot D_{MAX} \quad (3)$$

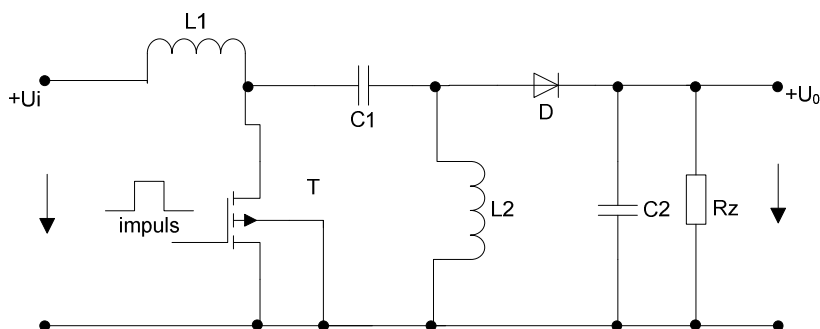
$$\Delta V = \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{C_1 \cdot f} \Rightarrow C1 = \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{\Delta V \cdot f} \quad (4)$$

1.5.2.2 Měnič SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter)

Tento měnič pracuje na obdobném principu jako Čukův měnič, jen neinvertuje výstupní napětí, tzn. že polarita vstupního a výstupního napětí na svorkách je stejná. Stejně jako u Čukova měniče může výstupní napětí nabývat nižších, stejných nebo vyšších hodnot než je napětí vstupní s minimálním výstupním zvlněním. Zapojení tohoto měniče je na obrázku 7.

Jednou z výhod SEPIC a ČUK měničů je to, že je lze zapojit i bez zátěže, přičemž nehrozí zničení spínacího prvku. Obvyklá předzátěž není potřeba, což má příznivý vliv na jednoduchost a vysokou účinnost. Další výhodou SEPIC architektury je proud odebíraný z napájecího zdroje, který je spojitý. Odrušení měniče je tedy jednodušší.

V minulosti bylo nevýhodou, že SEPIC architektura byla namáhána velkým proudovým zatížením spínacího prvku.

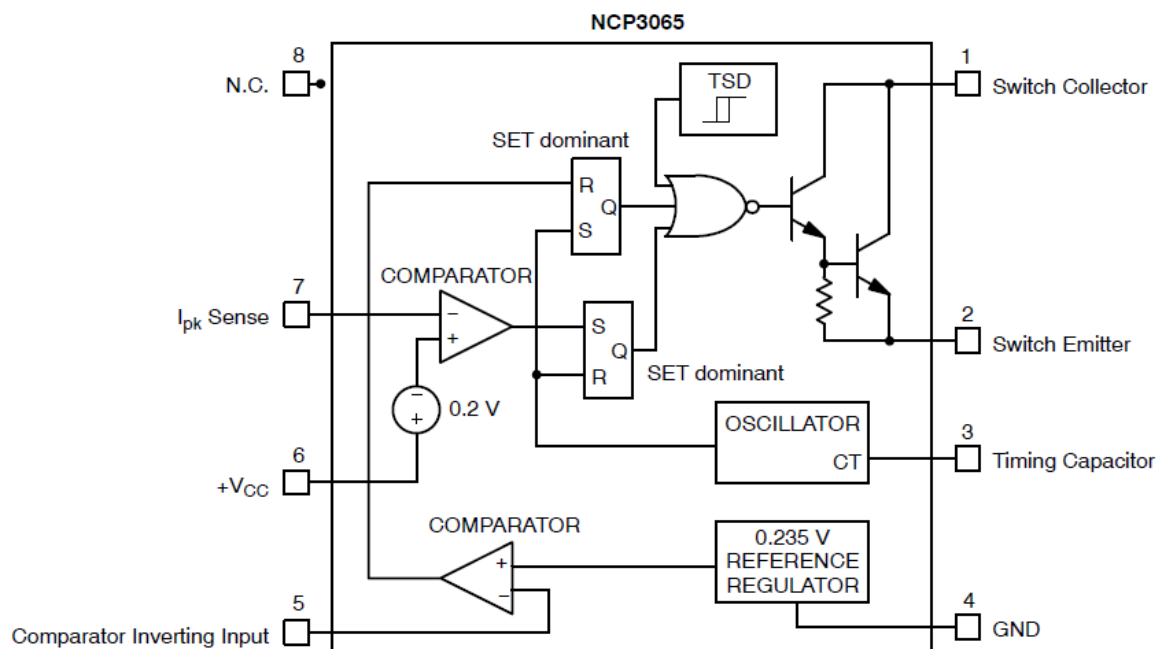


Obrázek 8) Základní zapojení sepic měniče

1.5.3 Obvod NCP3065

Obvod NCP3065 byl vybrán pro řízení spínaného zdroje. K hlavním parametrům tohoto obvodu patří vysoký pracovní proud, napájecí napětí, zpětná vazba, atd.

Jedná se o integrovaný obvod firmy OnSemiconductor, je to monolitický výkonový spínací regulátor, optimalizovaný pro aplikace s LED. Jeho flexibilní architektura umožňuje navrhnout přímo STEP-UP (zvyšující napětí) nebo STEP-DOWN (snižující napětí) zapojení s minimálním počtem externích součástek. Zařízení má nízkonapěťovou zpětnou vazbu s napětím 0.235 V, která se používá k regulaci průměrného proudu na zátěži. Obvod NCP3065 má navíc široký rozsah vstupního napětí - až 40V, což dovoluje operovat se střídavým nebo stejnosměrným napětím od 12 V. Toto napětí je používáno jak pro světelné aplikace, tak i pro neregulovatelné napájení jako jsou olověné baterie. Obvod může být zapojen jako řídící s přidaným externím tranzistorem na podporu vyšších jmenovitých proudů (nad 1,5 A). Vnitřní zapojení obvodu NCP3065 je znázorněno na obrázku 9 [11].



Obrázek 9) Vnitřní zapojení obvodu NCP3065

1.5.3.1 Funkce obvodu NCP3065

Obvod NCP3065 funguje jako pevný frekvenční oscilátor s výstupního napětí. Typické časovací průběhy jsou uvedeny v Grafu 2, kde je pro výstupní průběhy ukázán snižující měnič spolu s vlněním na výstupu. Během počátečního spuštění měniče zpětnovazební komparátor kontroluje, zda je výstupní napětí nižší než jmenovité. Jestliže je podmínka splněna, tak tranzistor začne spínat na kmitočtu a střídě, kterou řídí oscilátor uvnitř integrovaného obvodu. Na výstupu se začne nabíjet filtrační kondenzátor. Jakmile napětí zpětné vazby dosáhne jmenovitého napětí komparátorové hodnoty (0.235 V), tak je průběh výstupního tranzistoru potlačen. Když zatěžovací proud způsobí, že výstupní napětí poklesne pod jmenovitou hodnotu zpětné vazby komparátoru, spínání zapne okamžitě [11].

1.5.3.2 Oscilátor

Kmitočet oscilátoru a doba vypnutí výstupního spínače jsou nastaveny na hodnotu C_T časovacího kondenzátoru, který vytváří kladný pilovitý průběh. Tento průběh se objeví na pinu 3. Poměr zapnutí a vypnutí 6:1 stanoví maximální čas $t_{ON}/(t_{ON}+t_{OFF})$ typicky je to pak 85,7 %. Amplituda na oscilátoru je obvykle 500 mV [11].

1.5.3.3 Špičkový proud na komparátoru (I_{PK})

Za normálních podmínek se napětí zpětné vazby objeví na výstupu a ukončí se oscilátorem. Abnormální provozní podmínky nastanou tehdy, pokud bude výstup měniče přetížen, nebo když bude mít snímané napětí na zpětné vazbě nulový potenciál. Za těchto podmínek bude komparátor na pinu I_{PK} chránit Darlingtonovo zapojení tranzistorů na výstupu. Spínací proud je převeden na napětí vloženým rezistorem R_1 v sérii s napájením V_{CC} a výstupním Darlingtonovým zapojením. Úbytek napětí na odporu R_1 je sledován proudovým komparátorem. Jestliže je úbytek napětí větší než 200 mV, s ohledem na napájecí napětí U_{CC} , bude spínací tranzistor uzavřen. Komparátor zajišťuje, že výstupní spínací tranzistor má v daném cyklu jen jediný, na čase závislý, průběh.

Napětí U_{IPK} je specifikováno v neměnných podmínkách. V dynamickém provozu je proudová vypínací hodnota závislá na komparátorové době odezvy a di/dt proudové strmosti.

Napětí $V_{turn-off}$ v závislosti na odporu R_1 :

$$U_{turn-off} = U_{IPK(SENSE)} + R_1 \cdot (t_{delay} \cdot di/dt) \quad (5)$$

Typická doba odezvy t_{delay} v závislosti na I_{PK} komparátoru je 350 ns. Proudová strmost di/dt je dána napěťovým rozdílem tekoucím přes cívku a hodnotou cívky. Zvýšením hodnoty cívky se sníží strmost di/dt .

Je doporučeno ověřit si špičkový proud v aplikaci s nejhoršími podmínkami, aby se potvrdilo, že maximální proud protékající přes darlingtonovo zapojení není vyšší než 1.5 A [11].

1.5.3.3 Tepelný vypínač

Tepelné vypnutí uvnitř obvodu je aktivováno v případě, že maximální teplota spojení je překročena. Vypnutí je aktivováno typicky při překročení teploty 165 °C. V tomto případě se darlingtonovo spojení tranzistorů odpojí. Tepelný snímací obvod je navržen s hysterezí. Darlingtonův spínač je opět zapnut, pokud teplota čipu klesne pod nebezpečný práh. Funkce „vypnutí při přehřátí“ je poskytnuta proto, aby nedošlo k náhodnému katastrofálnímu přehřátí obvodu [11].

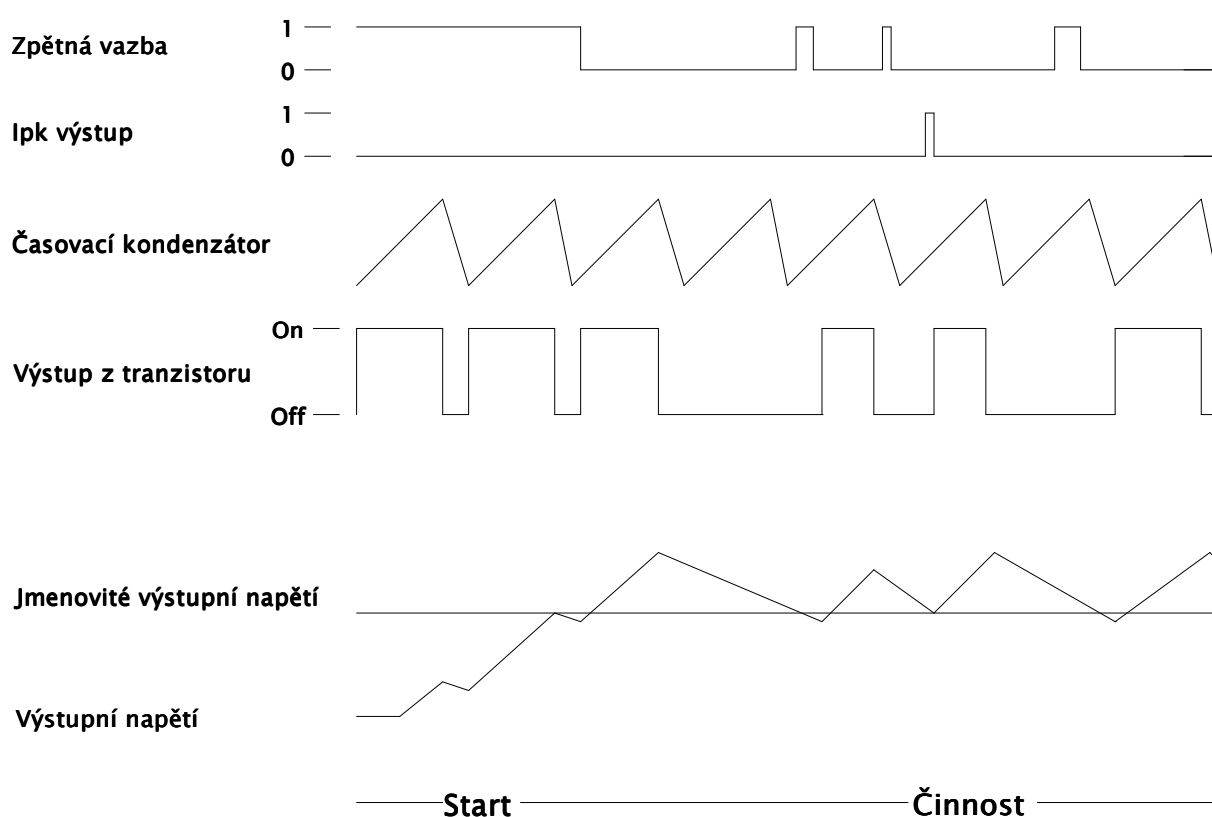
1.5.3.4 Žádné kapacitní vlivy na výstupu

Konstantní proud snižujícího měniče (regulátoru) je zaměřen na kontrolu proudu protékajícího přes zátěž nikoli na kontrolu napětí na zátěži. Spínací frekvence obvodu NCP3065 je v rozmezí 100-250 kHz. Tím je umožněno uvolnění proudu, který dosahuje

vyšších špičkových hodnot. Obvod NCP3065 umožňuje pracovat s topologií, která má malé zvlnění, a tím zmenšuje potřebu mít kapacitní filtr na výstupu [11].

1.5.3.5 Výstupní spínač

Výstupní spínač uvnitř obvodu NCP3065 je navržen v Darlingtonově zapojení. To umožňuje provozovat zařízení za všech podmínek s vysokou spínací rychlostí při nízkém úbytku napětí. Darlingtonův výstupní spínač je navržen tak, aby spínal max. při napětí 40 V a proudu max. 1,5 A na přechodu kolektor-emitor. [11]



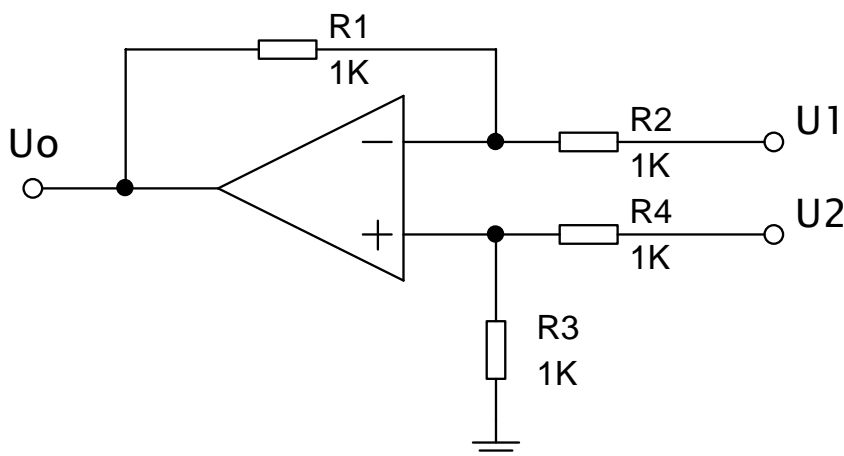
Graf 2) Časování obvodu NCP3065 [11]

Tabulka 2) Tabulka se vzorci pro výpočet důležitých parametrů použitých zapojení [11]

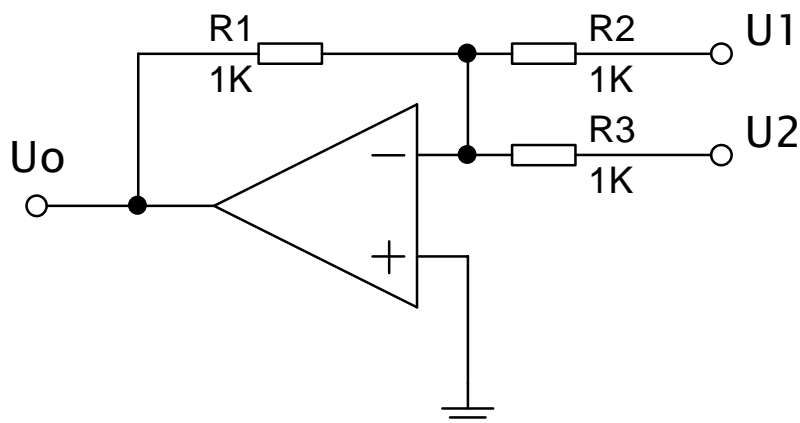
	Snižující napětí	Zvyšující napětí
$\frac{t_{on}}{t_{off}}$	$\frac{V_{out} + V_F}{V_{in} - V_{SWCE} - V_{out}}$	$\frac{V_{out} + V_F + V_{in}}{V_{in} - V_{SWCE}}$
t_{on}	$\frac{\frac{t_{on}}{t_{off}}}{f \cdot \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right)}$	$\frac{\frac{t_{on}}{t_{off}}}{f \cdot \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right)}$
C_T	$C_T = \frac{381,6 \cdot 10^{-6}}{f_{osc}} - 343 \cdot 10^{-12}$	
$I_{L(avg)}$	I_{out}	$I_{out} \cdot \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right)$
$I_{pk}(spínač)$	$I_{L(avg)} + \frac{\Delta I_L}{2}$	$I_{L(avg)} + \frac{\Delta I_L}{2}$
R_{SC}	$\frac{0.20}{I_{pk}(spínač)}$	$\frac{0.20}{I_{pk}(spínač)}$
L_1	$\left(\frac{U_{in} - U_{SWCE} - U_{out}}{\Delta I_L} \right) \cdot t_{on}$	$\left(\frac{U_{in} - U_{SWCE}}{\Delta I_L} \right) \cdot t_{on}$
$U_{zvlíní(pp)}$	$\Delta I_L \sqrt{\left(\frac{1}{8fC_0} \right)^2 + (ESR)^2}$	$\approx \frac{t_{on} \cdot I_{out}}{C_0} + \Delta I_L \cdot ESR$
U_{out}	$U_{TH} \cdot \left(\frac{R_{2}}{R_1} + 1 \right)$	$U_{TH} \cdot \left(\frac{R_{2}}{R_1} + 1 \right)$
I_{out}	U_{ref} / R_{sense}	U_{ref} / R_{sense}

1.5.4 Řízení výstupního napětí

Při regulaci výstupního napětí spínaného zdroje je potřeba ovlivňovat napětí na zpětnovazebním komparátoru (pin 5) v obvodu NCP3065. Tato regulace bude poskytnuta pomocí známého zapojení s operačním zesilovačem TLC272. Operační zesilovač je zapojen jako kombinace diferenčního (rozdílového) a sumačního (součtového) zesilovače, kde se pomocí referenčního napětí tj. 5 V řídí napětí výstupní. Oba zesilovače jsou zapojeny jako invertující tzn., že je napětí fázově otočeno o 180°. Ukázka zapojení diferenčního a sumačního zesilovače je na obrázku 10) a 11).



Obrázek 10) Zapojení rozdílového zesilovače



Obrázek 11) Zapojení součtového zesilovače

Diferenční (rozdílový) zesilovač má přes vstupní odpory přivedena dvě vstupní napětí U_1 a U_2 . Na výstupu operačního zesilovače se vyhodnocuje rozdíl (diference) úrovně obou vstupních napětí. Pokud platí rovnice [15]:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (6)$$

je výstupní napětí dáno vztahem:

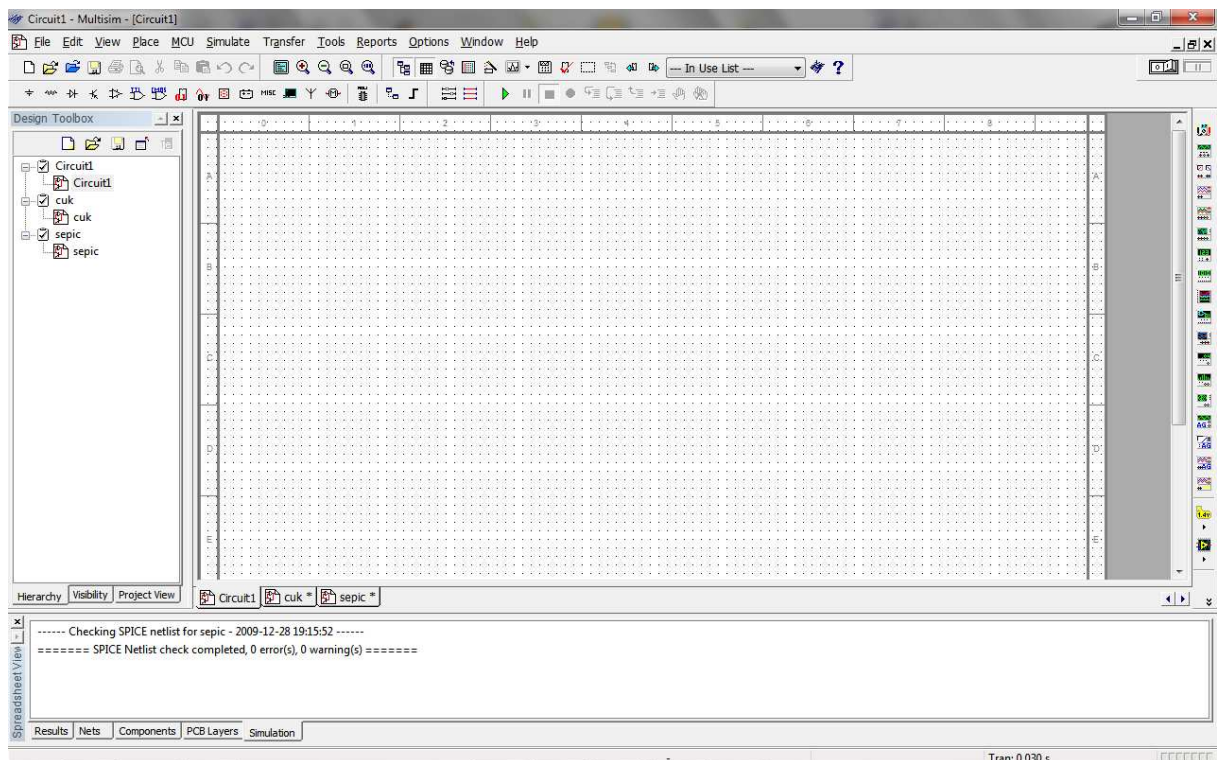
$$U_o = \frac{R_1}{R_2} \cdot (U_2 - U_1) \quad (7)$$

Sumační (součtový) zesilovač má na invertující vstup přes sčítací odpory připojeno několik vstupních napětí, jejichž počet se může libovolně měnit. Neinvertující vstup může být spojen se zemí i přes kompenzační rezistor. Výstupní napětí je dáno vztahem [15]:

$$U_o = -R_1 \cdot \left(\frac{U_1}{R_2} + \frac{U_2}{R_3} + \dots + \frac{U_N}{R_N} \right) \quad (8)$$

2. Simulace

Pro simulaci obvodu byl použit simulační program MultiSim ver.10.1.1. od firmy National Instruments.



Obrázek 12) Simulační prostředí MultiSim

2.1 Simulace obvodu pro řízení výstupního napětí

Pro simulaci byl použit operační zesilovač typu TLC272CP od firmy Texas Instruments a 1 k Ω odpory. K napájení OZ je použito 5 V, které je dodáváno ATX zdrojem. Regulací referenčního napětí na neinvertujícím vstupu diferenčního zesilovače bude regulováno výstupní napětí celého zdroje.

Operační zesilovač je zapojen v kombinaci spojení diferenčního a sumačního zesilovače. Díky této kombinaci zapojení je možno ovlivňovat komparátor uvnitř obvodu NCP3065 pomocí poměrně nízkého napětí.

2.1.1 Parametry

Známé parametry :

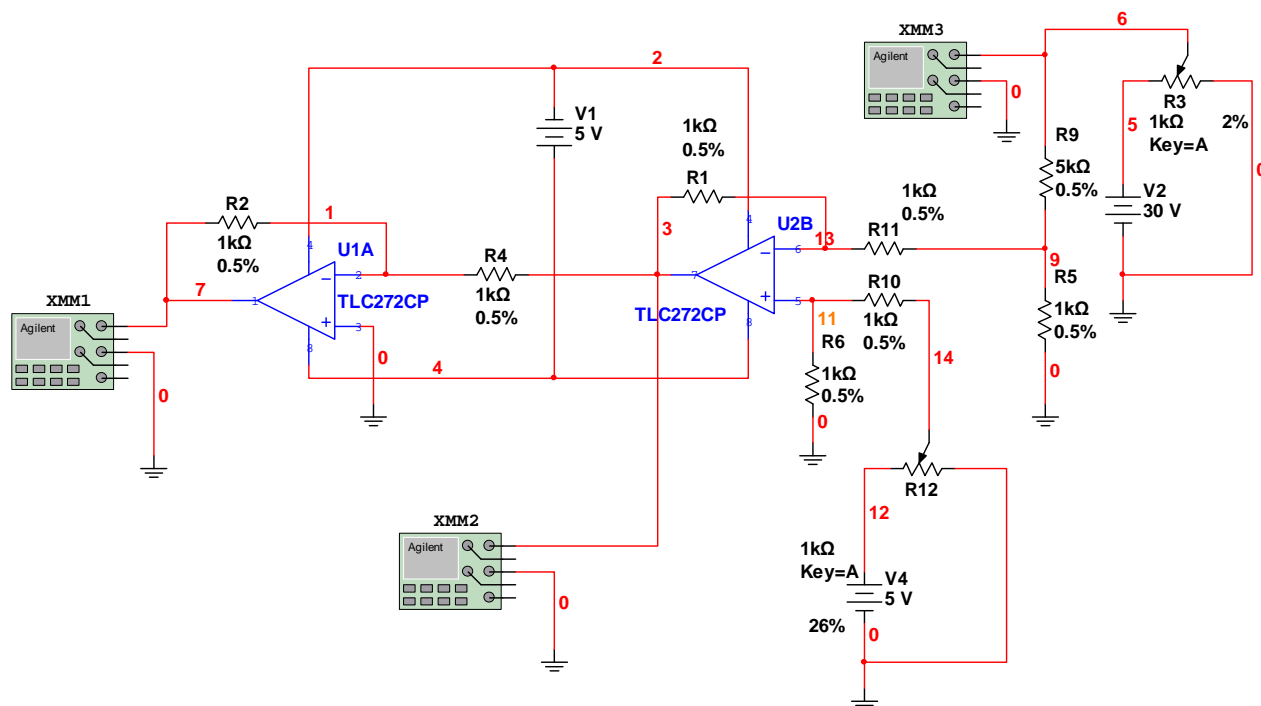
$U_{\text{ref}} = 0-5 \text{ V}$

$U_N = 5 \text{ V}$

$U_{\text{out}} = 0-30 \text{ V}$

$I_{\text{out}} = 0-2,5 \text{ A}$

$R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=1 \text{ k}\Omega$



Obrázek 13) Simulační obvod s operačním zesilovačem TLC272CP

Postup simulace:

Obvod byl sestaven podle známých zapojení součtového a rozdílového zesilovače. Zesilovač, který je na obrázku 13) vpravo, je zapojen jako rozdílový invertující zesilovač na jehož invertující vstup je přivedeno napětí z výstupního děliče celého spínaného zdroje. Napětí z děliče by se mělo pohybovat v rozmezí 0-5 V, což odpovídá dělicímu poměru 5:1 na výstupu. Na druhý neinvertující vstup je přivedeno regulovatelné referenční napětí 0-5 V, pomocí něhož se řídí výstupní napětí celého spínaného zdroje. Tato napětí se od sebe navzájem odečítají a výsledné napětí se potom objeví na výstupu tohoto zesilovače.

Druhý součtový zesilovač, který je na obrázku 13) vlevo má na neinvertující vstup přivedeno napětí z výstupu rozdílového zesilovače. Toto napětí je přičteno k nulovému potenciálu, protože není potřeba sčítat velké hodnoty (nad 1 V). Na výstupu se tedy objeví invertované napětí z předešlého rozdílového zesilovače, které by mělo nabývat kladných hodnot.

Napětí z výstupu součtového zesilovače je dále porovnáváno s napětím na komparátoru (Pin 5) v řídicím obvodu NCP3065.

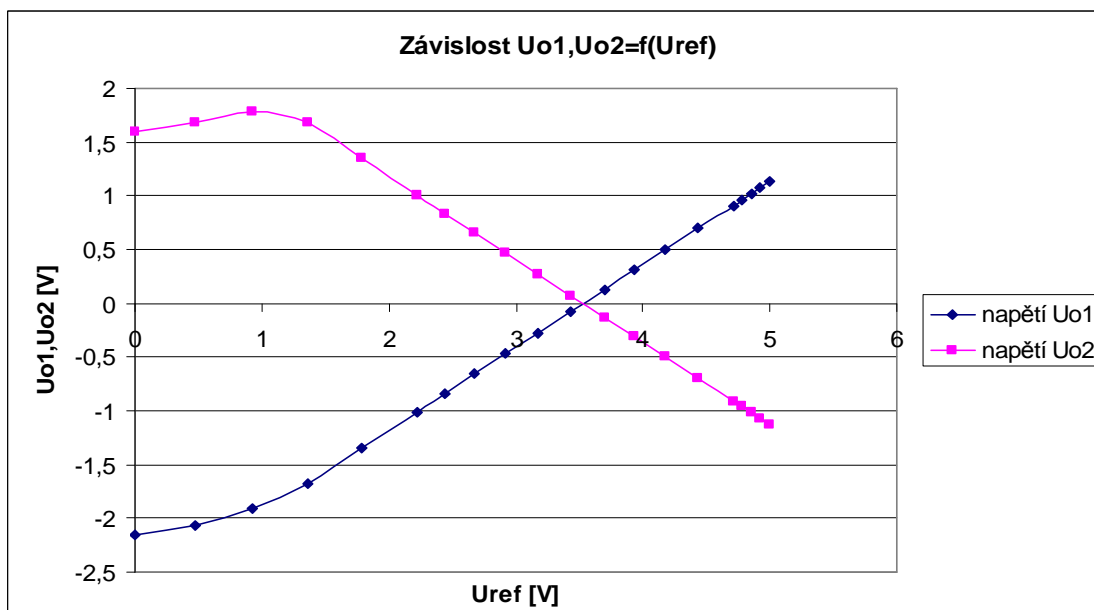
Tabulka 3) Tabulka odsimulovaných hodnot

R[Ω]	R[%]	Uref[V]	Uo1[V]	Uo2[V]
0	0	4,9999	1,1319	-1,1328
10	1	4,9256	1,0743	-1,0742
20	2	4,85244	1,01764	-1,0176
30	3	4,7804	0,961	-0,961
40	4	4,7095	0,907	-0,907
80	8	4,43672	0,6957	-0,6957
120	12	4,1793	0,4964	-0,4966
160	16	3,93553	0,3076	-0,3079
200	20	3,7037	0,1281	-0,1284
250	25	3,42857	-0,0784	0,07046
300	30	3,16742	-0,2801	0,2732
350	35	2,91807	-0,4727	0,46682
400	40	2,6785	-0,6577	0,6527
450	45	2,4471	-0,8364	0,83247
500	50	2,2222	-1,01	1,007
600	60	1,7857	-1,3473	1,3461
700	70	1,3574	-1,6774	1,6774
800	80	0,9259	-1,909	1,778
900	90	0,4784	-2,0604	1,6782
1000	100	0,0006	-2,15715	1,5922

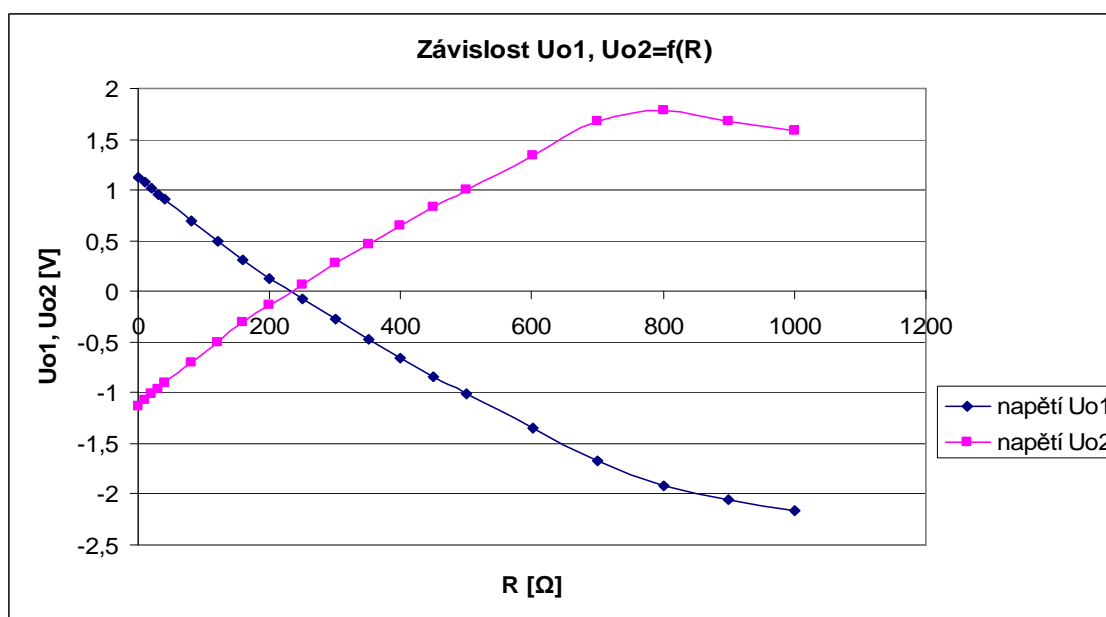
Odsimulované hodnoty byly zaznamenány do tabulky (viz. tabulka 3), ze které byly zhotoveny grafy.

První graf znázorňuje závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně referenčního napětí (viz. graf 3). Druhý graf znázorňuje závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně odporu referenčního napětí (viz. graf 4).

Simulace ukazuje, že je možné řídit napětí na výstupu součtového zesilovače. Je tedy možné ovlivňovat napětí, které je na vstupu komparátoru (pin 5) v obvodu NCP3065. Ten bude na výstupu celého spínaného zdroje regulovat velikost napětí.



Graf 3) Závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně referenčního napětí



Graf 4) Závislost výstupního napětí obou zesilovačů na změně odporu

3. Výpočty reálných součástek

Při výpočtu reálných součástek bylo postupováno následovně:

1. Podle vstupních a výstupních (zadaných) parametrů byly vypočteny hodnoty součástek na vstupu zařízení.

Vstupní parametry:

$$U_{IN} = 12 \text{ V}$$

Výstupní parametry:

$$U_{OUT} = 0-30 \text{ V}$$

$$I_{OUT} = 0-2,5 \text{ A}$$

$$P = 75 \text{ W}$$

Výpočet vstupní kapacity v zapojení **BOOST** i **BUCK** (zvyšující i snižující napětí) [8]:

- Velikost kapacity je určena jako filtrační tzn., že její velikost je určena podle velikosti zvlnění.
- Jelikož je vstupní kmitočet téměř nulový lze podle orientačního vztahu určit velikost kapacity C_1 .

$$C = \frac{3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_0}} \quad (9)$$

Výpočet odporů v celém obvodu **BOOST** i **BUCK**:

- Pro výpočet odporu **R1** je uveden vztah (viz. tabulka 2):

$$\frac{0.20}{I_{pk(spínač)}} \quad (10)$$

- Odpor **R2** a **R3** jsou zapojeny jako dělič napětí, jsou navrženy tak, aby na pin I_{pk} bylo přivedeno jen minimální napětí.
- Velikost odporů **R2**, **R3** můžeme vypočítat podle známého vzorce:

$$U_2 = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot U_1 \quad (11)$$

Činitel zvlnění Φ :

$$\Phi = \frac{\Delta U}{U_{DS}}, \quad (12)$$

kde ΔU je rozdíl max. a min. vstupního napětí a U_{DS} je střední hodnota vstupního napětí.

Určení typu výkonového tranzistoru:

- Tranzistor pro **BOOST** zapojení musí mít tyto parametry:
 - typ NMOS
 - I_{min} 3 A
 - U_{min} 30 V
 - Spínací napětí do 12 V
 - Ochranná dioda
 - Rychlé spínání

Podle těchto parametrů byl vybrán tranzistor **IRF540N**.

- Tranzistor pro **BUCK** zapojení musí mít tyto parametry:
 - typ PMOS
 - I_{min} 3 A
 - U_{min} 30 V
 - Spínací napětí do 12 V
 - Ochranná dioda
 - Rychlé spínání
 -

Podle těchto parametrů byl vybrán tranzistor **IRF9640**.

Postup pro výpočet induktorů je následovný:

- a) výpočet celkového výkonu zdroje[8]:

$$P = U_{OUT} \cdot I_{OUT} \quad (13)$$

- b) výpočet střední hodnoty proudu před tlumivkou[8]:

$$I_1 = \frac{P}{U_1} \quad (14)$$

c) výpočet maximálního proudu procházejícího cívkou[8]:

$$I_{MAX} = \frac{2 \cdot I_{OUT}}{\delta}, \quad (15)$$

kde δ je činitel plnění tj. velikost střídavy 0,5

d) výpočet velikosti cívky[8]:

$$L = \frac{U_1}{2 \cdot I_{MAX} \cdot f}, \quad (16)$$

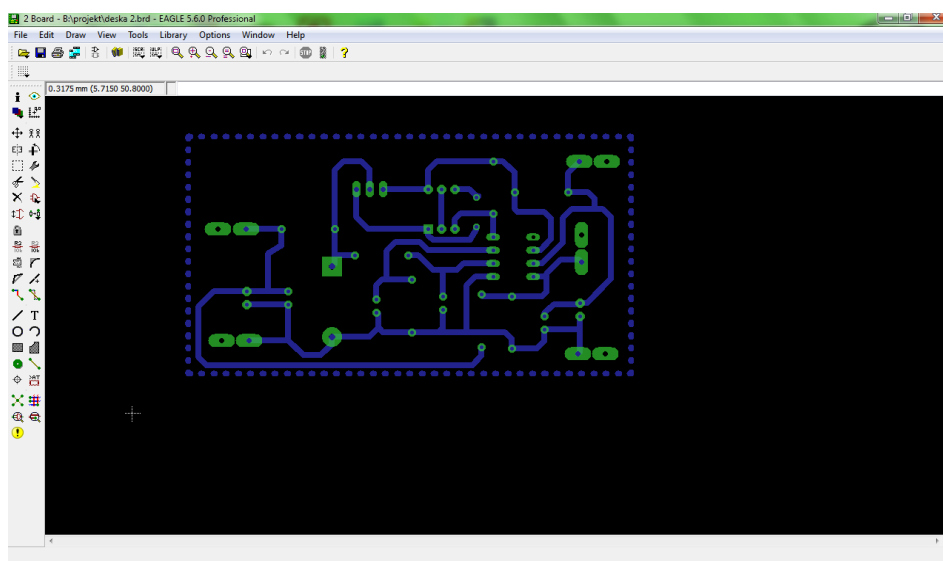
kde U_I je velikost vstupního napětí, I_{MAX} je maximální proud procházející cívkou při kmitočtu $f = 24$ kHz.

4. Výroba DPS

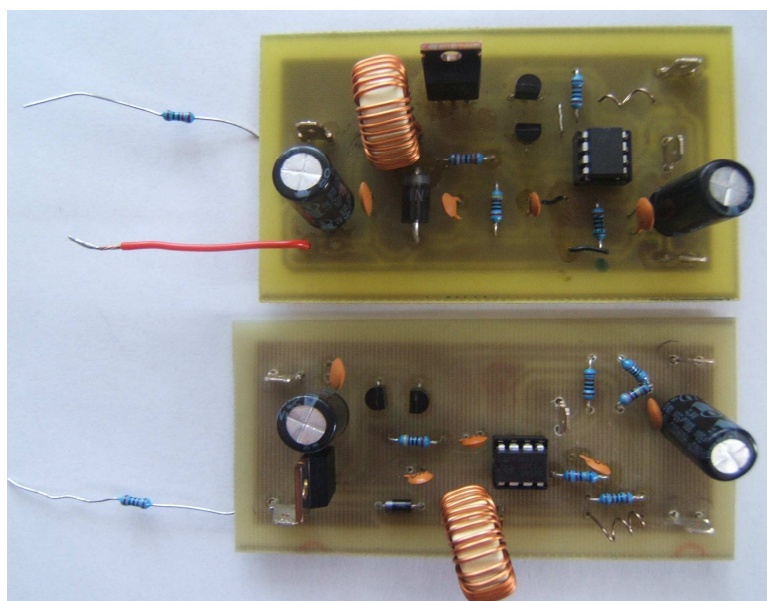
Pomocí doporučeného zapojení z katalogového listu s obvodem NCP3063, které bylo upraveno pro použití s obvodem NCP3065 do spínaného zdroje, byl vytvořen návrh pro výrobu desky plošných spojů (dále DPS).

4.1 Návrh DPS

K návrhu DPS byl použit program Eagle ver.5.6.0. Doporučené schéma bylo překresleno a upraveno v tomto programu (schematic) a poté převedeno pomocí funkce „switch to board“ na návrh samotné DPS.



Obrázek 14) Návrh DPS v programu EAGLE



Obrázek 15) Fotka obou vyrobených DPS. Nahoře se snižujícím měničem, dole se zvyšujícím měničem

5. Závěr

Bakalářská práce nenavazuje přímo na semestrální projekt. V semestrálním projektu se pracovalo s jiným řídicím obvodem a jinými napěťovými měniči. I přes tyto změny zůstal cíl práce stejný. A to vyrobit spínaný zdroj tak, aby byl využitelný k laboratorním účelům.

V práci byla podrobněji shrnuta problematika spínaných zdrojů, především zapojení měničů napětí a jejich použití. Informace o řídicím obvodu NCP3065 jsou přeloženy z katalogového listu firmy OnSemiconductor. Smyslem simulace bylo ukázat, že výstupní napětí lze řídit analogově pomocí operačních zesilovačů. Pomocí referenčního napětí 5 V a výstupního napětí (max. 30 V) se (po odečtení v rozdílovém a po sečtení v součtovém zesilovači) dá ovlivňovat napětí na integrovaném komparátoru v obvodu NCP3065.

Hodnoty odporů a napětí, které je potřeba znát při takto zapojených zesilovačích, byly vypočteny podle uvedených vztahů v kapitole **1.5.4**. V práci jsou uvedeny odvození a vztahy pro výpočet reálných součástí spínaného zdroje.

Během praktické části bakalářské práce jsem navrhnul a vyhotovil dvě zkušební desky plošných spojů, které měly sloužit k „oživení“ a nastavení správných parametrů spínaného zdroje. Bohužel právě toto nastavování a neustálé upravování desek, mělo za následek, že práce nebyla dokončena v daném termínu. V „oživování“ bylo dosaženo toho, že jsou obě desky schopny dodávat potřebné napětí na výstupu při 12 V napájecího napětí. Bylo proměřeno, jak se chová zpětná vazba při změně napětí na vstupu zpětnovazebního komparátoru (pin5) a bylo zjištěno, zda lze regulovat napětí na výstupu zdroje.

V dalších krocích zbývá spojit desky tak, že zapojení se snižujícím měničem bude dodávat napětí od 0 V do 12 V a deska se zvyšujícím měničem bude regulovat napětí od 12 V do 30 V. Vyhotovením analogového řízení pomocí dvou zesilovačů, které je v práci odsimulováno, bude řízeno napětí na výstupu zdroje.

Literatura

- [1] ALBERT, Filip. *Blokové schéma spínaného zdroje*. [online] 2008. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Spinany_zdroj_blokove_schema.png>.
- [2] BABČANÍK, Jan. *Spínané zdroje* [online]. 2007. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/ART1876-Spinane-zdroje.html>>.
- [3] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I*. České Budějovice: KOPP, 2005, ISBN 80-7232-171-4.
- [4] *Designing a SEPIC converter* [online]. 2008 [cit. 2009-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.national.com/an/AN/AN-1484.pdf>>.
- [5] CHLOUBA, Daniel. *Univerzální regulovatelný spínaný zdroj* [online]. 2001. Dostupný z WWW: <http://ivanskemasakr.ic.cz/elweb/spinany_zdroj_1.pdf>.
- [6] *Impulsní napájecí zdroj* [online]. Praha: ČVUT, fakulta elektrotechnická. Dostupný z WWW: <http://dce.felk.cvut.cz/es/blany_honcu/napzdr_imp.pdf>.
- [7] JAROLÍMEK. *Dvojité induktory pro stejnosměrné měniče s topologií SEPIC od firmy Coilcraft, Čtenářský servis* [online]. 2008. Dostupný z WWW: <http://www.elsou.cz/index/Katalog_soubory/Firmy/Coilcraft_soubory%5CCoilcraft%20-%20SEPIC%20inductors.pdf>.
- [8] KOPECKÝ, Ladislav. *Zvyšující DC-DC měnič*. [online] 2007. Dostupný z WWW: <<http://kopecky.rtyne.net/simulace/boost-conv.pdf>>.
- [9] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha : Technická literatura BEN, 1996, ISBN 80-86056-02-3.
- [10] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. Praha: Technická literatura BEN, 1996, ISBN 80-86056-03-1.
- [11] NCP3065, NCV3065. *Datasheet*. [online]. OnSemiconductor. Dostupný z WWW: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP3065.PDF>.
- [12] NCP3063, NCP3063B, NCV3063. *Datasheet*. [online]. OnSemiconductor. Dostupný z WWW: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP3063-D.PDF>.
- [13] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice 5.vydání*. Praha: Technická literatura BEN, 2002, ISBN 80-7300-059-8.

[14] VLČEK, Jiří. *Základy elektrotechniky*. Praha: Technická literatura BEN, 2003.

[15] ZLÁMAL. *Operační zesilovače 1*. [online] 2008. Zlín: UTB, ústav elektrotechniky a měření. Dostupný z WWW:

< http://mikroelektro.utb.cz/e107_files/downloads/1227009285_operacni_zesilovace_1.pdf >.

Příloha:

Seznam součástek použitých na DPS

Součástky pro osazení desky *zvyšující napětí* (BOOST):

Rezistory: R1= 82 mΩ
R2= 1 kΩ
R3= 18 MΩ
R4= 1 kΩ
R5= 24 kΩ
R6= 1 kΩ
R7= 470 Ω
R8= 1 kΩ

Kapacity: C1= 330 μF
C2= 100 nF
C3= 10 nF
C4= 1,2 nF
C5= 6,8 nF
C6= 100 nF
C7= 330 μF

Tranzistory: NPN BC549
PNP BC557
NMOS IRF540N

Cívka: L1= 10μF

Dioda: D1= 1N5819

Řídicí obvod: IO= NCP3065

Součástky pro osazení desky *snižující napětí* (BUCK):

Rezistory: R1= 50 mΩ
R2= 1,7 kΩ
R3= 1 kΩ
R4= 1 kΩ
R5= 22 kΩ
R6= 470 kΩ

Kapacity: C1= 330 μ F
C2= 100 nF
C3= 6,8 nF
C4= 2,2 nF
C5= 100 nF
C6= 330 μ F

Tranzistory: NPN BC549
PNP BC557
PMOS IRF9640

Cívka: L1= 10 μ F

Dioda: D1= 1N5822

Řídicí obvod: IO= NCP3065

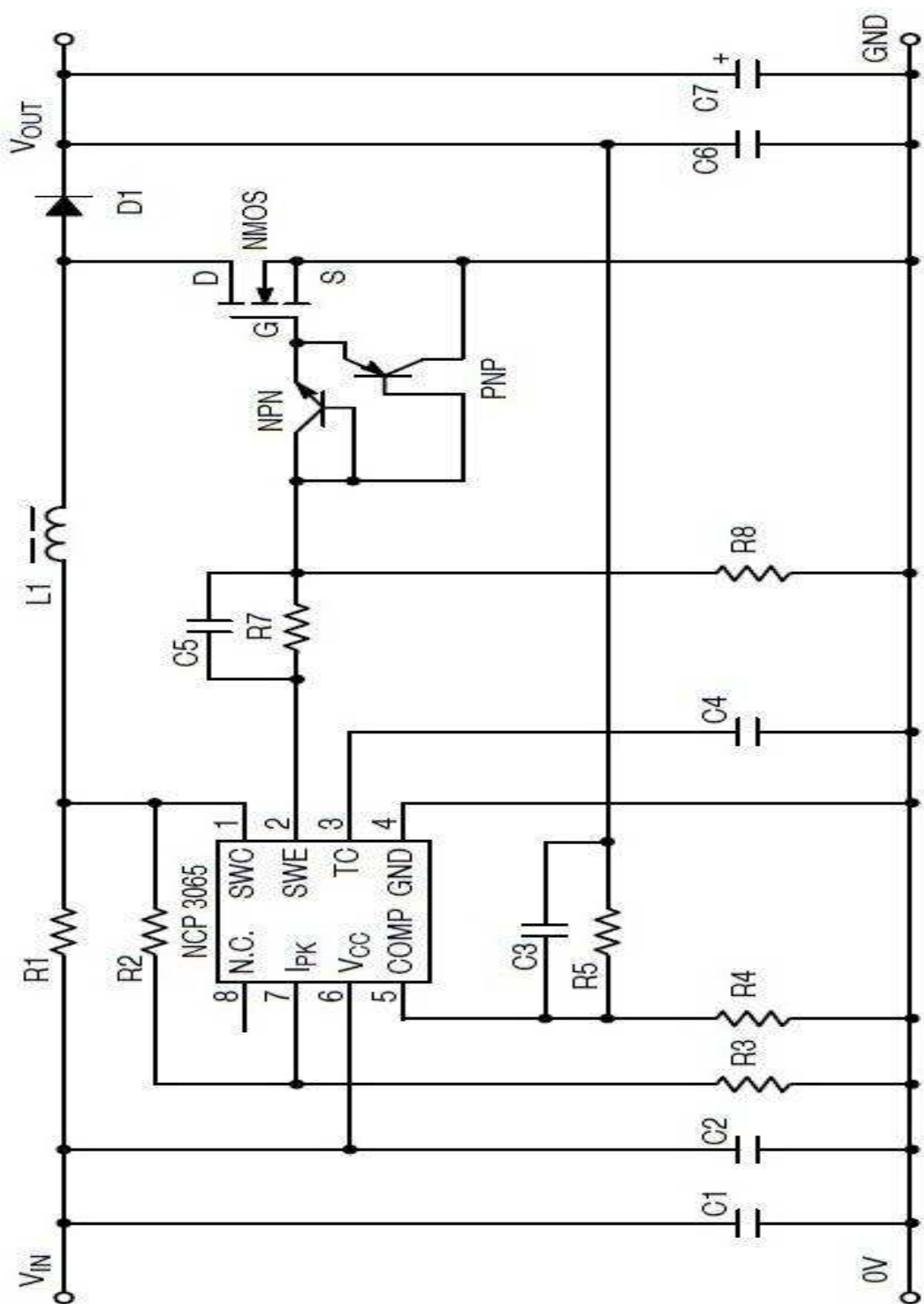


Schéma zapojení zvyšující napětí

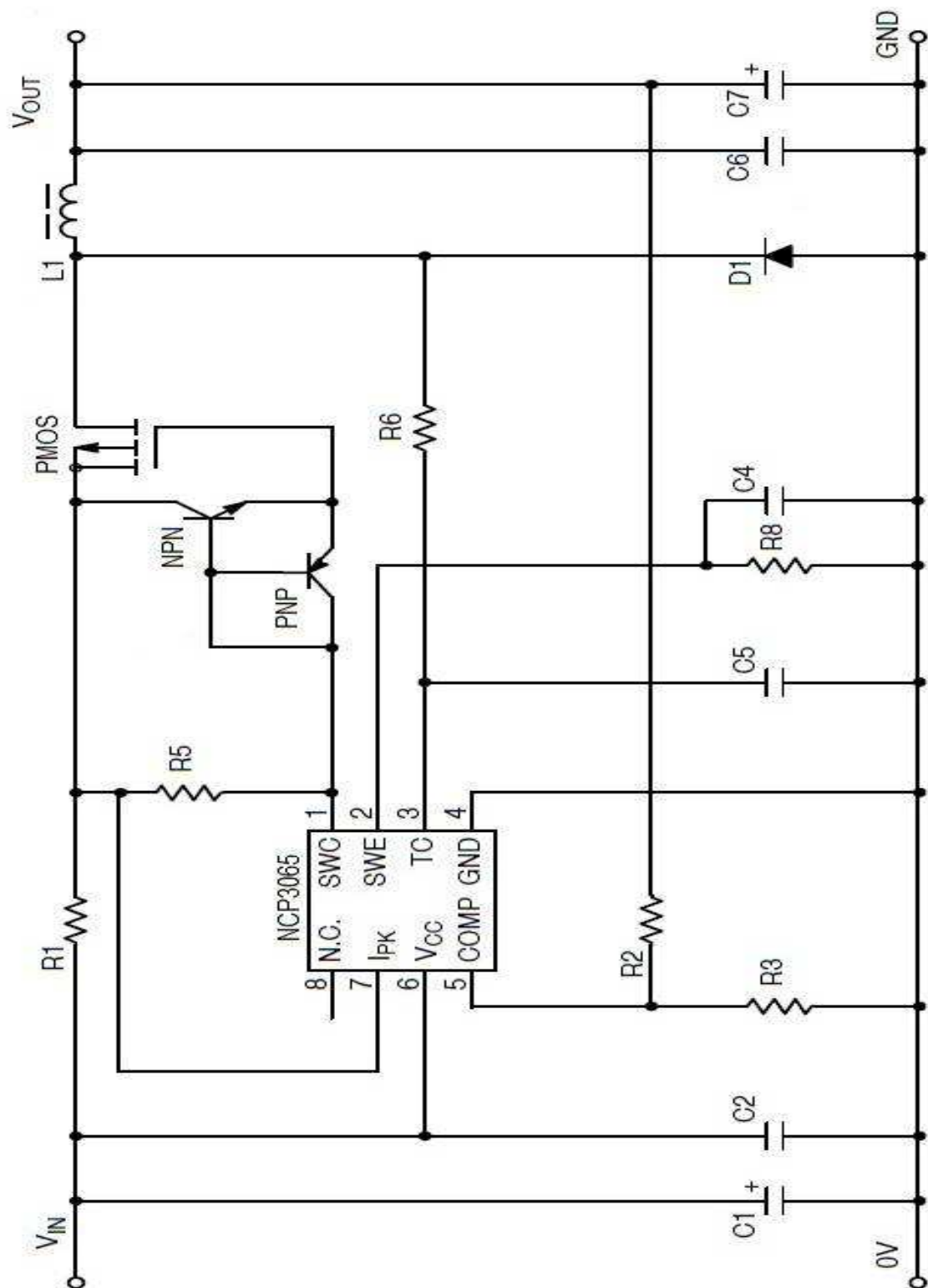


Schéma zapojení snižující napětí